Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 14, No. 1 (2024) 105–126.

Paper Type: Original Article

Presenting a Fuzzy Mathematical Programming Model for Allocating and Scheduling Parts in a Flexible Manufacturing System (FMS) and the Impact of Repairs and Maintenance on Product Quality

Jafar Hassan Beigi[1], Meqdad Jahromi[1,*] Mohammad Taghipour[1]

[1] Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; jafar.hassanbigi@yahoo.com; m.jahromi@iau-tnb.ac.ir; mohamad_taghipour@yahoo.com.

Citation:

Received: 20 December 2023 *Revised: 09 February 2024* *Accepted: 18 April 2024*	Hassan Beigi, J., Jahromi, M., & Taghipour, M. (2024). Presenting a fuzzy mathematical programming model for allocating and scheduling parts in a flexible manufacturing system (FMS) and the impact of repairs and maintenance on product quality. *Journal of Quality Engineering and Management, 14*(1), 105-126.

Abstract

Purpose: This study aims to develop a mathematical model for flexible job shop scheduling. The primary focus is on optimizing three objectives: the makespan, the maximum machine workload, and the total workload. The ultimate goal is to enhance productivity and flexibility in manufacturing systems.

Methodology: Two metaheuristic algorithms, NSGA-II and MOGWO, were used to solve the model. The model was first validated on a small scale, and then a sensitivity analysis was conducted on larger instances. The performance of the algorithms was compared based on accuracy and solution quality metrics.

Findings: The results indicated that MOGWO performs better on medium-sized problems, while in large-scale cases, the difference between the two algorithms is not significant. The highest sensitivity was observed among the objectives with respect to production and maintenance costs. Additionally, a resource allocation pattern and optimal sequence of operations were derived.

Originality/Value: The originality of this research lies in developing and applying a multi-objective mathematical model for flexible job shop scheduling, considering real-world constraints such as costs and resource limitations. The simultaneous use and detailed comparison of NSGA-II and MOGWO across different problem sizes is another contribution. Furthermore, the proposed operational pattern improves the applicability of the results in industrial environments.

Keywords: Flexible manufacturing, Gray wolf algorithm, Genetic algorithm, Optimization.

Corresponding Author: m.jahromi@iau-tnb.ac.ir

10.48313/jqem.2024.215017

Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره۱۴ ، شماره (۱)، (۱۴۰۳)، ۱۲۶-۱۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

ارایه یک مدل برنامه ریزی ریاضی فازی به منظور تخصیص و زمانبندی انجام قطعات در یک سیستم تولید انعطاف پذیر (FMS) و تاثیر تعمیرات و نگهداری بر کیفیت محصول

جعفر حسن بیگی[۱]، مقداد جهرمی[۱]*، محمد تقی پور[۱]

[۱]گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف توسعه یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر انجام شده است. تمرکز اصلی بر بهینه‌سازی سه هدف: زمان تکمیل سفارش‌ها، بار کاری حداکثری ماشین‌ها و مجموع بار کاری است. هدف نهایی افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری در سیستم‌های تولیدی است.

روش‌شناسی پژوهش: از دو الگوریتم فرا ابتکاری *NSGA-II* و *MOGWO* برای حل مدل استفاده شده است. ابتدا مدل در مقیاس کوچک اعتبارسنجی شد و سپس در ابعاد بزرگ‌تر تحلیل حساسیت انجام گرفت. مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها با شاخص‌های دقت و کیفیت راه‌حل‌ها صورت گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد *MOGWO* در مسایل متوسط عملکرد بهتری دارد، ولی در مسایل بزرگ تفاوت معناداری با *NSGA-II* ندارد. بیشترین حساسیت اهداف نسبت به هزینه ساخت و نگهداری مشاهده شد. همچنین الگوی تخصیص منابع و ترتیب بهینه فعالیت‌ها استخراج گردید.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: اصالت این پژوهش در توسعه و کاربرد یک مدل ریاضی ترکیبی برای زمان‌بندی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با چندین هدف متضاد و در نظر گرفتن محدودیت‌های واقعی از جمله هزینه‌ها و منابع تولیدی است. همچنین استفاده هم‌زمان از دو الگوریتم *NSGA-II* و *MOGW* و مقایسه دقیق عملکرد آن‌ها در ابعاد مختلف، نوآوری دیگری از این تحقیق محسوب می‌شود. ارایه یک الگوی عملیاتی برای توالی فعالیت‌ها نیز به کاربردی‌تر شدن نتایج پژوهش در محیط‌های صنعتی کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: تولید انعطاف پذیر، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی.

۱- مقدمه

به حداکثر رساندن سود شرکت و بهره‌برداری کامل از منابع تولید محدود، یک مساله بهینه‌سازی کلیدی در برنامه‌ریزی استراتژیک شرکت‌هاست. به‌علاوه، مساله اصلی دیگر چگونگی بهینه‌سازی عملکرد (خروجی) تولید داخلی شرکت با توجه به انواع محصولات است. در جهان صنعتی امروز، به تولید به‌عنوان یک سلاح رقابتی نگریسته می‌شود و سازمان‌های تولیدی در محیطی قرارگرفته‌اند که از ویژگی‌های آن می‌توان به افزایش فشارهای رقابتی، تنوع در محصولات، تغییر در انتظارات اجتماعی و افزایش سطح توقع مشتریان اشاره کرد. محصولات درحالی‌که باید بسیار کیفی باشند، تنها زمان کوتاهی در بازار می‌مانند و باید جای خود را به محصولاتی بدهند که با آخرین ذائقه، سلیقه و یا نیاز مشتریان سازگار هستند. بی‌توجهی به

خواست مشتری و یا قصور در تحویل به‌موقع ممکن است بسیار گران تمام شود. شرایط فوق سبب گردیده تا موضوع اطلاعات برای سازمان‌های تولیدی از اهمیت زیادی برخوردار شود.

از طرف دیگر، آخرین بررسی‌ها حاکی از آن است که استراتژی رقابتی مبتنی بر بازار خود نیز به‌تدریج در حال گذر است و چشم‌انداز استراتژیک رقابت در آینده مبتنی بر منابع خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر درحالی‌که شرکت‌ها امروزه موفقیت را در تبعیت و استفاده درست از قوانین، فرصت‌ها و شرایط دیکته شده توسط بازار می‌دانند، استراتژی مبتنی بر منابع بر این موضوع تاکید دارد که منفعت و موفقیت بیشتر با اتکا بر مزیت‌ها و منابع منحصربه‌فرد و قابل‌اطمینان شرکت و سرمایه‌گذاری به‌منظور توسعه و حفاظت از آن‌ها حاصل خواهد شد. البته منابع تولیدی موردنظر تنها شامل سرمایه، زمین، ماشین‌آلات و تجهیزات نمی‌شوند، بلکه بنای تولید نسل آینده بر تاکید و توجه به اطلاعات، مدیریت دانش و توجه ویژه به مساله آموزش افراد خواهد بود.

۲- بیان مساله

وضعیت به وجود آمده و تحولات صورت گرفته مذکور در حوزه فعالیت‌های تولیدی، اگرچه خود حاصل به‌کارگیری گسترده و همه‌جانبه فناوری‌های اطلاعاتی در این حوزه است، ولی درعین‌حال باعث توجه مضاعف سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی به مقوله اطلاعات و فناوری‌های مرتبط با آن شده است. این تحقیق با هدف تبیین موضوع فوق صورت گرفته است و سعی دارد تا نقش و تاثیر فناوری اطلاعات در وضعیت کنونی تولید و ساخت کالاها را به تصویر بکشد. اهمیت این بررسی از آنجا ناشی می‌شود که چند سالی است در کشور، افزایش تعداد واحدهای تولیدی و به‌تبع آن تحقق نسبی فضای رقابتی باعث گردیده تا توجه تولیدکنندگان و شرکت‌های صنعتی به کیفیت محصولات، افزایش سهم بازار و مساله صادرات معطوف گردد. از همین رو به نظر می‌رسد دانستن تحولات صورت گرفته در بخش‌های تولیدی جوامع پیشرفته می‌تواند در تعیین و شناخت بهتر مسیری که سازمان‌های تولیدی و صنعتی کشور برای ارتقای توان رقابتی خود باید طی کنند موثر واقع شود. در این مقاله شرح داده خواهد شد که چگونه توسعه‌های اخیر در حوزه فناوری اطلاعات به‌ویژه هوش مصنوعی و سیستم‌های خبره، وضعیت تولید در جوامع صنعتی را دگرگون ساخته است.

در طول چند دهه اخیر مفهوم سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر به‌عنوان یک جواب قابل‌قبول معتبر برای پاسخگویی به سؤالات انعطاف‌پذیری و کارایی مطرح شده است. با این حال اگرچه این سیستم‌ها باعث افزایش انعطاف‌پذیری می‌شوند اما پیچیدگی‌هایی با خود به همراه دارند. هرگونه اشتباه در برنامه‌ریزی و به‌کارگیری این سیستم‌ها، ممکن است منجر به کاهش راندمان و قابلیت اطمینان تجهیزات و افزایش نیاز به سرمایه‌گذاری بی‌رویه هزینه‌های تولیدی شود. یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر هزینه زیادی دارد و تنها هنگامی بازگشت سرمایه‌گذاری دارای توجیه اقتصادی است که سیستم با راندمان بالایی به‌کار گرفته شود. لذا به‌منظور استفاده بهینه از امکانات و کاهش هزینه‌ها و نیز لزوم پاسخ سریع به تغییر در محصولات، برنامه‌ریزی تولید برای چنین محیط‌هایی اهمیت خاصی پیدا می‌نماید [1]. زمان‌بندی شامل برنامه‌ریزی و اولویت‌دهی فعالیت‌هایی است که لازم است به ترتیب عملیات انجام شوند. زمان‌بندی یک فعالیت تصمیم‌گیری است که به‌عنوان هدف، بهینه‌سازی یک یا چند هدف را بر عهده دارد. زمان‌بندی معمولا به تخصیص کارها در بین یک مجموعه پیچیده از ماشین‌ها برمی‌گردد و توالی معمولا در ارتباط با تغییر کامل مجموعه کارها یا ترتیبی که کارها باید روی یک ماشین معین پردازش شوند، می‌باشد.

بهینه‌سازی مساله تولید انعطاف‌پذیر حالت کلی‌تر از مساله تولید می‌باشد و از پیچیدگی بیشتری نسبت به آن برخوردار است. از این‌رو زمان انجام محاسبات به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و به همین دلیل استفاده از روش‌های بهینه‌سازی سنتی موثر نیست، یا اگر قابل استفاده باشند، بسیار زمان‌بر خواهند بود؛ بنابراین محققان به سمت روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری گام برداشته‌اند و در پی استفاده از الگوریتم‌های کاراتر هستند تا میزان انحرافات را نسبت به جواب بهینه اصلی کاهش دهند و جواب‌های حاصل به بهینه نزدیک‌تر باشند. در این تحقیق مساله سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن حرکت هم‌زمان قطعه و ابزار را به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک در نظر گرفته شده و یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی برای سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر ارایه شده است که از عوامل موثر توسعه و رشد اقتصادی کشورهای توسعه‌نیافته و درحال‌توسعه می‌باشد و در بخش خصوصی، ابزاری اساسی برای تامین سودآوری و رضایتمندی به شمار می‌رود.

۳- ضرورت انجام تحقیق

تولید انعطاف‌پذیر سیاست نسبتا جدیدی است که توسط شرکت‌های موفق برای توسعه و افزایش رقابت به‌کار گرفته می‌شود. با استفاده از تولید انعطاف‌پذیر می‌توان انواع محصولات متناسب با نیاز مشتری را تولید کرد. تولید انعطاف‌پذیر به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که مراحل تولید بین تولید محصولات متعدد را تغییر دهد و به‌طور سریع و موثر پاسخگوی نیازهای مشتریان باشد؛ در کنار آن، روش‌های مختلفی به‌منظور حل مسایل بهینه‌سازی وجود دارد. بعضی از این روش‌ها به‌صورت تکراری و بر مبنای گرادیان، نقطه بهینه تابع هدف را می‌یابند. این روش‌ها معمولا سرعت بالایی دارند ولی در عوض مشکل افتادن در دام بهینه محلی را با خود حمل می‌کنند. در مقابل روش‌های فرا ابتکاری وجود دارند که اغلب برگرفته از تکامل جسمی و ژنتیکی بوده و به جستجوی نقطه بهینه مطلق تابع می‌پردازند. امروزه بسیاری از سازمان‌های صنعتی و خدماتی، دولتی و خصوصی فعالیت‌های خود را در قالب تولید انعطاف‌پذیر تعریف می‌کنند. با توجه به اینکه در این سازمان‌ها معمولا اهداف چندگانه در نظر گرفته می‌شود، وجود یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی با قابلیت در نظر گرفتن اهداف متفاوت می‌تواند بسیار مفید باشد؛ بنابراین نتایج این تحقیق می‌تواند برای این گونه سازمان‌ها مفید باشد. همچنین می‌تواند در مبحث برنامه‌ریزی تولید در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار گیرد. در صنعت افراد نیازمند حل سریع مساله زمان‌بندی تولید در مقیاس بزرگ می‌باشند. این موضوع باعث گرایش محققان به سمت روش‌های فرا ابتکاری شده است. روش‌های فرا ابتکاری معمولا به جواب بهینه دسترسی پیدا نمی‌کنند، بلکه جواب‌هایی نزدیک به بهینه تولید می‌نمایند.

۴- اهداف تحقیق

هدف علمی و کلی این تحقیق توسعه مدل ریاضی برای مساله سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر است در حالتی که حرکت قطعه و ابزار به‌صورت هم‌زمان می‌باشد و برخی پارامترها به‌صورت فازی در نظر گرفته شده است. اهداف فرعی که در این مطالعه دنبال می‌شوند به شرح زیر می‌باشند:

۱. مطالعه و بررسی تحقیقات انجام‌گرفته در حوزه سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر
۲. مدل‌سازی ریاضی فازی مساله تولید انعطاف‌پذیر برای حل مسایل کوچک و متوسط
۳. ارایه روش حل برای مساله تولید انعطاف‌پذیر به کمک الگوریتم‌های فرا ابتکاری
۴. ارزیابی کارایی روش‌های پیشنهادی و مقایسه الگوریتم‌ها با یکدیگر
۵. امکان به‌کارگیری مدل و نتایج حاصل از این تحقیق به‌منظور برنامه‌ریزی‌های بهتر در سیستم‌های تولیدی در کلیه مراکز و کارخانه‌ها و صنایع با شرایط مشابه

۵- مراحل انجام تحقیق

اولین گام در انجام تحقیق مطالعه ادبیات موضوع به‌منظور کسب دانش و تعیین جایگاه تحقیق حاضر در میان مطالعات انجام شده می‌باشد. در ادامه به‌منظور تعیین اعتبار مدل ارایه شده یک مثال کوچک به‌صورت دستی حل می‌شود و پارامترها و متغیرهای مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از مدل‌سازی مساله، با استفاده از نرم‌افزارهای اعتبارسنجی مدل مانند لینگو و یا گمز در سایز کوچک مساله را حل کرده و سپس با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مساله را در سایزهای کوچک و بزرگ حل می‌کنیم.

۶- پیشینه تحقیق

مساله موردبررسی در این تحقیق یک مساله برنامه‌ریزی تولید انعطاف‌پذیر در حالت تک دوره‌ای می‌باشد. در این مساله قطعات مختلفی وجود دارد که در مواقع موردنیاز و در طول مدت‌زمان تولید، توسط وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار [1] مربوطه بین ماشین‌های مختلف موجود در سیستم

[1] Automated Guided Vehicle (AGV)

حرکت می‌کنند. برای انجام عملیات مختلف روی این قطعات، نیاز به ابزارهایی می‌باشد که این ابزارهای بین ماشین‌ها با وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار که مخصوص ابزار می‌باشد جابه‌جا می‌شوند. در ادبیات، این امکان حرکت قطعات و ابزارها را سیاست ترکیب ماشین - ابزار پویا می‌نامند. لازم به ذکر است که این تحقیق یک مساله چند هدفه است و اهدافی از جمله حداقل کردن زمان تکمیل کل کار و حداقل کردن هزینه‌های تولید و حمل محصولات هستیم. به دلیل اینکه جز مسایل چندجمله‌ای غیردقیق سخت[1] می‌باشد، در مدت‌زمان قابل قبولی حل این مساله شدنی نیست [2]؛ بنابراین برای حل این مساله از روش‌های فرا ابتکاری گوناگونی استفاده شده است [3]، [4].

تعیین دقیق اینکه کدام یک از الگوریتم‌های فرا ابتکاری به نتیجه بهتری دست خواهد یافت امری پیچیده است. در سیاست حرکت ابزار و قطعه به‌طور هم‌زمان یا ترکیب ماشین‌ابزار پویا در طول افق برنامه‌ریزی تولید، ابزارها و قطعات با وسایل هدایت‌شونده مختص به خودبین ماشین‌ها جابه‌جا می‌شوند. این سیاست باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این سیستم‌ها می‌شود. به طوری‌که زمان‌های بیکاری ماشین‌ها کمتر شده و همچنین زمان انتظار قطعات برای انجام عملیات‌های مربوطه کاهش می یابد که نهایتا انتظار می‌رود در این حالت زمان تکمیل سفارش‌ها کاهش یابد، این سیاست اولین بار توسط جهرمی و همکاران [5] برای مساله تخصیص عملیات به ترکیب ماشین‌ابزار در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر ارایه شد. چن و سارنکر [6] یک مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی صفر و یک برای مساله تخصیص عملیات به ماشین‌ابزار با سیاست حرکت قطعات بین ماشین‌ها ارایه داد و این مساله را با الگوریتم فرا ابتکاری مورچگان حل کردند. آن‌ها برای این منظور مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی صفر و یک‌چند هدفه آرمانی را برای مساله تخصیص عملیات‌ها به ترکیبات ماشین‌ابزار ارایه کرده که آرمان‌ها را به‌صورت فازی در نظر گرفتند و آن را با الگوریتم فرا ابتکاری مورچگان بدون در نظر گرفتن چند هدفه بودن مدل حل نمودند.

بویارگن و همکاران [7] به ارایه یک الگوریتم ابتکاری برای حل مساله تخصیص عملیات به ماشین‌ابزار با سیاست حرکت ابزار بین ماشین‌ها ارایه کردند به طوری‌که در این الگوریتم ابتکاری، نحوه انتخاب ابزار برای انجام عملیات‌های موجود، بر مبنای نسبت عمر ابزار به‌اندازه ابزار برای نصب روی هر ماشین در نظر گرفته شده بود. چن و هو [8] رویکرد مسایل چندهدفه برای حل مساله برنامه‌ریزی تولید در محیط سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن چهار هدف کمینه کردن مجموع زمان شناوری قطعات، عدم تعادل بارکاری ماشین‌ها، بزرگترین بار کاری ماشین‌ها و کل هزینه ماشین‌کاری ارایه نمودند. نگرجونا و همکاران [9] یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای رویکرد برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای برای حل مساله کمینه کردن عدم تعادل بار کاری ارایه کرده‌اند که محدودیت‌های تکنولوژیکی از جمله زمان در دسترس بودن ماشین‌ها و محدودیت نصب ابزار روی ماشین‌ها را در نظر می‌گیرد.

مهدوی و همکاران [10] مدلی چندهدفه برای مساله تخصیص عملیات به ترکیب ماشین‌ابزار در محیط سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با سیاست حرکت قطعه در طول دوره زمانی تولید ارایه کردند که مدل آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک می‌باشد، در واقع مدل برنامه‌ریزی خطی آن‌ها همان مدل چن و سارنکر [6] می‌باشد با این تفاوت که مدل چن و سارنکر به‌صورت یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی آرمانی ارایه شده ولی مهدوی و همکاران [10] مدل خود را به‌صورت چندهدفه ارایه کرده‌اند و به دنبال پیدا کردن بهترین مرز بهینه پاراتو می‌باشند. پرسی و همکاران [11] رویکردی ابتکاری که در سطوح بالای آن اندازه انباشته‌ها مشخص می‌شوند و در سطوح پایینی آن اندازه انباشته‌ها توالی داده شده و از طریق زمان‌بندی به هم ارتباط پیدا می‌کنند ارایه کرده‌اند. لا و همکاران [3] یک مدل چندهدفه برای حل مساله زمان‌بندی سیستم تولید انعطاف‌پذیر که در آن میانگین زمان شناوری قطعات و میانگین تاخیر کارها و میانگین زمان بیکاری ماشین‌ها به‌طور هم‌زمان کمینه می‌شوند ارایه کرده است. جهرمی و همکاران [5] از یک روش فرا ابتکاری به نام بهینه‌سازی مورچگان پاراتو یی برای حل مساله انتخاب ترکیب ماشین‌ابزار مناسب برای انجام سفارش‌ها استفاده کرده‌اند سیاستی که آن‌ها استفاده کرده‌اند سیاست حرکت قطعه در طول دوره زمانی تولید بوده است و تابع هدف آن‌ها کمینه کردن هزینه تولید و زمان کل ساخت بوده است. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پیشرفته با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم‌های ساخت کارگاهی انعطاف‌پذیر را موردبررسی قرار داده‌اند. در کار آن‌ها عامل‌های انسانی در امر مدل‌سازی در نظر گرفته شده است و یک رویکرد جدید برای اعمال اثر یادگیری در

[1] Non-deterministic Polynomial Hard (NP-Hard)

مساله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پیشرفته ارایه شد. همچنین با توجه به پیچیدگی محاسباتی مدلی که آن‌ها، یک الگوریتم ژنتیک چندمرحله‌ای برای حل مدل پیشنهادی آن‌ها ارایه شده است.

جهرمی و همکاران در سال [2]، مساله زمان‌بندی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن سیاست ترکیب ماشین- ابزار پو یا یعنی سیاستی که در آن امکان حرکت هم‌زمان قطعات و ابزارها با وسایل هدایت‌شونده مختص به خود در طول دوره زمانی تولید وجود دارد، موردبررسی قرار دادند. مولفان یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی صفر و یک ارایه دادند. همچنین به دلیل ماهیت *NpHard* بودن آن، یک الگوریتم تکاملی خاص ارایه نمودند [2].

بوآزا و همکاران [12] به ارایه مساله برنامه‌ریزی پو یا برای محصولات هوشمند در سیستم تولید انعطاف‌پذیر پرداختند. مولفان ماشین‌های نامربوط، خانواده‌های متفاوت از محصولات، مجموعه عملیات متفاوتی را در نظر گرفتند. لی و همکاران [13] یک روش بهینه‌سازی برای تولید کارگاهی و ماشین‌کاری انعطاف‌پذیر با بازه‌های کاری پو یا و خرابی ماشین را در نظر گرفتند. در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی که به هنگام بروز وقایع پو یا، مشاغل و وضعیت برنامه ماشین را به‌روز می‌کند، پیشنهاد شده است. این روش دو حالت برای مصرف انرژی ابزار ماشین در نظر می‌گیرد: ماشین‌کاری واقعی و بیکار بودن دستگاه / آماده‌به‌کار. مدل بهینه‌سازی، کل مصرف انرژی و زمان مصرف را در نظر می‌گیرد و از روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای دستیابی به یک راه‌حل استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در تنظیم برنامه در پاسخ به حوادث پو یا موثر است.

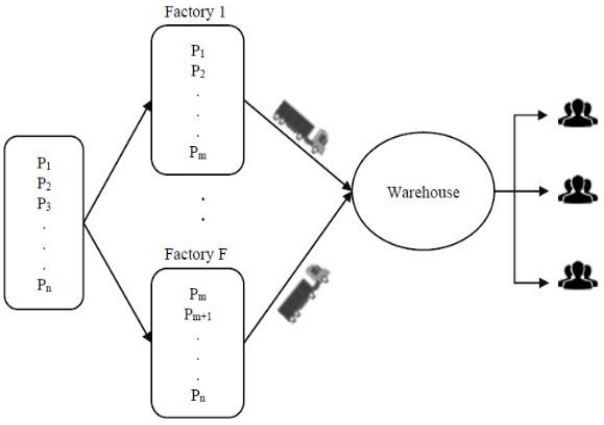
یانگ و همکاران [14] مساله بهینه‌سازی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن اختلالات نامشخص در خرابی ماشین را در نظر گرفتند. در این مقاله مساله برنامه‌ریزی برای سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر تحت اختلالات نامطمئن خرابی ماشین که در آن تخصیص ماشین و برنامه‌های کاری باید تعیین شود برای دستیابی به مجموعه‌ای از نیازهای تولید مطالعه می‌شود. برای این منظور یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی بر اساس مفهوم سناریوی آستانه ارایه شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی محققان در مقایسه با رو یکردهای مختلف استاندارد در دستیابی به موعد برنامه‌ریزی‌شده تحت عدم اطمینان عملکرد خو بی دارد. کاربرد عملی رو یکرد معرفی‌شده با استفاده از یک نرم‌افزار صنعت مهر زنی واقعی تایید شده است که در آن قطعات مهر زنی انواع مختلف موتور سیم‌پیچ صوتی هستند که در محرک‌های درایو دیسک سخت تجاری استفاده می‌شوند.

در این تحقیق سعی شده است مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک برای مساله زمان‌بندی در محیط سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن سیاست حرکت هم‌زمان قطعه و ابزار در بین ماشین‌ها ارایه شود. اکثر محققین در بررسی این مساله، تنها حرکت قطعه و یا ابزار را به‌صورت جداگانه موردبررسی قرار داده‌اند و حرکت هم‌زمان آن‌ها کمتر موردبررسی قرار گرفته است. فرض خواهیم کرد در سیستم، سیاست تعمیرات و نگهداری وجود دارد. همچنین فرض خواهیم کرد که برخی پارامترها به‌صورت فازی است، به‌علاوه فرض خواهیم کرد که چندین کارخانه در مساله وجود دارد و به دنبال حداقل کردن زمان تکمیل کل کار و حداقل کردن هزینه‌های تولید و حمل محصولات هستیم.

۷- شرح مدل

در این تحقیق مساله سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن حرکت هم‌زمان قطعه و ابزار به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم فرض می‌شود که سیاست تعمیر و نگهداری وجود داشته و برخی پارامترها به‌صورت فازی در نظر گرفته می‌شود ضمنا فرض می‌شود که چندین کارخانه در مساله وجود دارد که هر کارخانه قادر به تولید تعدادی محصول می‌باشد و پس از تولید هر محصول در کارخانه این محصول به انبار محصولات ارسال می‌شود. به‌عبارت‌دیگر قطعات از انبار مرکزی وارد سیستم تولید می‌شود و در خصوص اینکه هر قطعه بهتر است در کدام کارخانه تولید شود تصمیم‌گیری می‌شود سپس قطعه موردنظر به کارخانه انتخاب‌شده منتقل شده و در خصوص اینکه بر روی کدام ماشین و ابزار عملیات قطعه انجام گیرد تصمیم‌گیری می‌شود با توجه به اینکه امکان خرابی تجهیزات در نظر گرفته شده است لذا هزینه و زمان تعمیر و نگهداری پیش‌بینی‌شده و می‌تواند منجر به افزایش هزینه کل سیستم و زمان ساخت کل شود.

پس از انجام عملیات قطعه به انبار منتقل می‌شود اما در خصوص اینکه هر قطعه به کدام کارخانه منتقل شده و از کدام کارخانه خارج شود تصمیم‌گیری شده و در نهایت قطعه با در نظر گرفتن هزینه انتقال به انبار منتقل می‌شود. هر قطعه دارای عملیات متعددی می‌باشد که به‌صورت متوالی چیده و دارای تقدم و تاخر می‌باشد. شمای کلی مدل به شرح ذیل می‌باشد:



شکل ۱- شماتیک مدل.

Figure 1- Model schematic.

همان‌گونه که دیده می‌شود قطعات از یک انبار مرکزی به کارخانه‌ها انتقال داده شده و هر قطعه صرفا به یک کارخانه وارد می‌شود در نتیجه در خصوص کارخانه مورد نظر تصمیم‌گیری شده و عملیات ساخت قطعه با در نظر گرفتن هزینه و زمان افزوده‌شده به دلیل تعمیر و نگهداری احتمالی افزوده می‌گردد و در نهایت قطعه از کارخانه خارج و به سمت انبار منتقل می‌شود. سه هدف در این مدل به شرح زیر می‌باشد:

۱. حداقل ساختن زمان کار
۲. حداقل ساختن هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری
۳. حداقل ساختن هزینه حمل‌ونقل

در ادامه مفروضات مدل به شرح ذیل می‌باشد:

۱. مدل به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.
۲. پارامترهای هزینه ساخت، هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه عملیات و زمان ساخت به‌صورت فازی در نظر گرفته می‌شوند.
۳. هر قطعه دارای عملیات متفاوتی است که هر کدام از عملیات با ترکیب ماشین و ابزار به‌عنوان گزینه‌های پیشنهادی صورت می‌گیرد.
۴. زمان مربوط به نصب قطعات و ابزار روی ماشین‌های مختلف صفر در نظر گرفته شده است.
۵. بین عملیات هر قطعه یا سفارش روابط پیش‌نیازی و پس‌نیازی وجود دارد در واقع این بدین مفهوم است که عملیات هر قطعه باید به ترتیب انجام شود.
۶. یک ابزار در هر واحد زمانی نمی‌تواند به‌صورت هم‌زمان روی دو ماشین یا بیشتر مورد استفاده قرار گیرد به‌بیان‌دیگر هر ابزار در هر واحد زمانی حداکثر روی یک ماشین می‌تواند وجود داشته باشد.
۷. زمان حمل‌ونقل به زمان ساخت اضافه نمی‌شود.
۸. زمان تعمیر و نگهداری به زمان ساخت اضافه می‌کند.
۹. هر قطعه صرفا در یک کارخانه باید ساخته شود.

اندیس‌ها

p	قطعه
o	عملیات
l	ابزار
m	ماشین
f	کارخانه

پارامترها

$\widetilde{PC}_{pf}$	هزینه ساخت قطعه p در کارخانه f
$\widetilde{MC}_{pomlf}$	هزینه عملیات قطعه P با ماشین m با ابزار l
$\widetilde{NC}_{pomlf}$	هزینه تعمیر و نگهداری و عملیات o قطعه p با ابزار l روی ماشین m در کارخانه f
SC_{pof}	هزینه حمل قطعه p برای انجام عملیات o به کارخانه f
CF_{pf}	هزینه حمل قطعه P از کارخانه f به انبار
λ_{mf}	اگر ماشین m در کارخانه f نیازمند تعمیر و نگهداری باشد ۱ و در غیراین‌صورت صفر
β_{mfl}	اگر ابزار l روی ماشین m در کارخانه f نیازمند تعمیر و نگهداری باشد ۱ و در غیراین‌صورت صفر
$T\lambda_{mf}$	زمان تعمیر و نگهداری ماشین m در کارخانه f
$T\beta_{mfl}$	زمان تعمیر و نگهداری ابزار l روی ماشین m در کارخانه f
T_{pomlf}	زمان انجام عملیات o روی قطعه p با ماشین m تحت ابزار l در کارخانه f

متغیرهای تصمیم

X_{pf}	اگر عملیات ساخت قطعه p د کارخانه f انجام شود ۱ و در غیراین‌صورت صفر است.
Y_{pomlf}	اگر عملیات o قطعه p با استفاده از ماشین m با ابزار l در کارخانه f انجام شود.
V_{pomlf}	اگر عملیات o قطعه p با ابزار l روی ماشین m در کارخانه f همراه با تعمیر و نگهداری انجام شود ۱ و در غیراین‌صورت صفر است.
S_{pof}	اگر عملیات o قطعه p در کارخانه f شروع شود ۱ و در غیراین‌صورت صفر است.
FF_{pof}	اگر عملیات o قطعه p در کارخانه f تمام شود ۱ و در غیراین‌صورت صفر است.
ST_{pofml}	زمان شروع عملیات o برای انجام قطعه p در کارخانه f با استفاده از ماشین m و ابزار l
FT_{pofml}	زمان خاتمه عملیات o برای انجام قطعه p در کارخانه f با استفاده از ماشین m و ابزار l
$CMAX$	زمان ساخت

$$MIN\ Z1 = CMAX. \qquad (۱)$$

رابطه (۱) به‌عنوان تابع هدف اول به دنبال حداقل ساختن زمان تکمیل کار می‌باشد.

$$MIN\ Z2 = \sum_p \sum_f \widetilde{PC}_{pf}.X_{pf} + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \widetilde{MC_{pomlf}}.Y_{pomlf} + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \widetilde{NC_{pomlf}}.\lambda_{mf}.V_{pomlf} + \sum_p \sum_o \sum_m \sum_l \sum_f \widetilde{NC_{pomlf}}.\beta_{mfl}.V_{pomlf}. \qquad (۲)$$

رابطه (۲) تابع هدف دوم مساله است که به دنبال حداقل ساختن هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری به‌واسطه محاسبه هزینه تولید و تعمیر و نگهداری در صورت نیاز به تعمیر و نگهداری و همچنین هزینه عملیات می‌باشد در واقع هزینه عملیات هزینه متغیر و هزینه ساخت هزینه ثابت کارخانه می‌باشد.

$$z3 = \sum_p \sum_o \sum_f SC_{pof}.S_{pof} + \sum_p \sum_o \sum_f CF_{pf}.FF_{pof}. \qquad (۳)$$

رابطه (۳) به دنبال حداقل ساختن هزینه حمل‌ونقل به‌عنوان تابع هدف سوم مساله می‌باشد که این هزینه به دو بخش هزینه حمل قطعه از مبدا به کارخانه و از کارخانه به انبار می‌باشد.

$$MAX = max\,(FT_{pofml}). \qquad (۴)$$

رابطه (۴) نشانگر این است که زمان تکمیل ساخت برابر با حداکثر زمان خاتمه ساخت یک قطعه می‌باشد.

$$ST_{pofml} + T_{pomlf} + \lambda_{mf}.T\lambda_{mf} + \beta_{mfl} + T\beta_{mfl} = ST_{p+1ofml}. \qquad (۵)$$

رابطه (۵) نشانگر تقدم و تاخر فعالیت‌ها بوده و بیان می‌کند که زمان شروع عملیات قطعه بعدی برابر با زمان شروع قطعه قبلی، زمان ساخت قطعه قبلی و همچنین زمان تعمیر و نگهداری ماشین یا انبار در صورت نیاز به تعمیر و نگهداری می‌باشد.

$$ST_{pofml} + T_{pomlf} + \lambda_{mf}.T\lambda_{mf} + \beta_{mfl} + T\beta_{mfl} = FT_{pofml}. \quad (۶)$$

رابطه (۶) نشانگر زمان تکمیل ساخت یک قطعه با در نظر گرفتن زمان شروع عملیات قطعه، زمان ساخت و زمان تعمیر و نگهداری ماشین و انبار می‌باشد.

$$FT_{pofml} = ST_{p+1ofml}. \quad (۷)$$

رابطه (۷) بیان می‌کند که زمان خاتمه یک قطعه برابر با زمان شروع عملیات قطعه بعدی خواهد بود.

$$\sum_{f} \quad X_{pf} = 1. \quad (۸)$$

رابطه (۸) نشان می‌دهد امکان ساخت یک قطعه فقط در یک کارخانه امکان‌پذیر است.

$$Y_{pomlf} \leq X_{pf}. \quad (۹)$$

رابطه (۹) نشان می‌دهد اگر قطعه‌ای در کارخانه‌ای برای تولید انتخاب نشده باشد امکان انتخاب ماشین برای عملیات آن وجود ندارد.

$$\sum_{m} \quad Y_{pomlf} = 1. \quad (۱۰)$$

رابطه (۱۰) بیان می‌کند که هر قطعه صرفا بر روی یک ماشین قابل انجام بوده و امکان انجام آن بر روی چند قطعه وجود ندارد.

$$V_{pomlf} \leq Y_{pomlf}. \quad (۱۱)$$

رابطه (۱۱) بیان می‌کند اگر عملیاتی روی ماشینی صورت نگیرد امکان تعمیر و نگهداری برای آن وجود ندارد.

$$\sum_{m} \quad V_{pomlf} = 1. \quad (۱۲)$$

رابطه (۱۲) نشان می‌دهد که امکان تعمیر و نگهداری صرفا برای هر عملیات و هر قطعه روی یک ماشین امکان‌پذیر است.

$$S_{pof} \leq X_{pf}. \quad (۱۳)$$

رابطه (۱۳) نشان می‌دهد اگر کارخانه‌ای برای تولید یک قطعه انتخاب نشود امکان شروع عملیات آن قطعه در آن کارخانه وجود ندارد.

$$FF_{pof} \leq X_{pf}. \quad (۱۴)$$

رابطه (۱۴) نشان می‌دهد اگر کارخانه‌ای برای تولید یک قطعه انتخاب نشود امکان خاتمه عملیات آن قطعه در آن کارخانه وجود ندارد.

$$\sum_{f} \quad S_{pof} = 1. \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۵) بیان می‌کند که شروع هر فعالیت صرفا در یک کارخانه امکان‌پذیر است.

$$\sum_{f} \quad FF_{pof} = 1. \quad (۱۶)$$

رابطه (۱۶) بیان می‌کند که خاتمه هر فعالیت صرفا در یک کارخانه امکان‌پذیر است.

$$ST_{pofml} \leq MX_{pf}. \quad (۱۷)$$

رابطه (۱۷) نشان می‌دهد که زمان شروع یک فعالیت برای هر قطعه در هر کارخانه در صورتی محاسبه می‌شود که ساخت آن قطعه به کارخانه موردنظر تخصیص‌یافته باشد.

$$S_{pof} = FF_{pof}. \quad (۱۸)$$

رابطه (۱۸) نشان می‌دهد که زمان خاتمه یک فعالیت برای هر قطعه در هر کارخانه در صورتی محاسبه می‌شود که ساخت آن قطعه به کارخانه موردنظر تخصیص‌یافته باشد.

$$X_{pf} \in \{0,1\}. \quad (۱۹)$$

$$Y_{pomlf} \in \{0,1\}. \quad (۲۰)$$

$$V_{pomlf} \in \{0,1\}. \quad (۲۱)$$

$$S_{pof} \in \{0,1\}. \quad (۲۲)$$

$$FF_{pof} \in \{0,1\}. \quad (۲۳)$$

رابطه (۱۹) تا **رابطه (۲۳)** شانگر بازه متغیرهای باینری مساله است.

$$ST_{pofml} \geq 0. \quad (۲۴)$$

$$FT_{pofml} \geq 0. \quad (۲۵)$$

$$CMAX \geq 0. \quad (۲۶)$$

رابطه (۲۴) تا رابطه (۲۶) نشانگر بازه متغیرهای عدد صحیح مساله است.

فازی زدایی

با توجه به غیرقطعی بودن مدل از روش خیمنز برای فازی زدایی مدل استفاده می‌شود. با فازی زدایی، **رابطه‌های (۲)، (۵)، (۶)** که دارای ماهیت فازی می‌باشد به ترتیب به روابط ذیل تبدیل می‌شوند.

$$\sum_{p}\sum_{f}\frac{PC1_{pf}+2PC2_{pf}+PC3_{pf}}{4}.X_{pf}+\sum_{p}\sum_{o}\sum_{m}\sum_{l}\sum_{f}\frac{MC1_{pf}+2MC2_{pf}+MC3_{pf}}{4}.Y_{pomlf}$$
$$+\sum_{p}\sum_{o}\sum_{m}\sum_{l}\sum_{f}\frac{NC1_{pf}+2NC2_{pf}+NC3_{pf}}{4}.\lambda_{mf}.V_{pomlf} \quad (۲۷)$$
$$+\sum_{p}\sum_{o}\sum_{m}\sum_{l}\sum_{f}\frac{NC1_{pf}+2NC2_{pf}+NC3_{pf}}{4}.\beta_{mfl}.V_{pomlf}.$$

$$ST_{pofml}+\frac{T1_{pfmo;}+2T2_{pfmo;}+T3_{pfmo;}}{4}+\lambda_{mf}.T\lambda_{mf}+\beta_{mfl}+T\beta_{mfl}=ST_{p+1ofml}. \quad (۲۸)$$

$$ST_{pofml}+\frac{T1_{pfmo;}+2T2_{pfmo;}+T3_{pfmo;}}{4}+\lambda_{mf}.T\lambda_{mf}+\beta_{mfl}+T\beta_{mfl}=FT_{p+1ofml}. \quad (۲۹)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود **رابطه (۲۷)** تا **رابطه (۲۹)** شکلی فازی زدایی شده **رابطه‌های (۲)، (۵)، (۶)** می‌باشند.

۸- روش حل و تحلیل یافته‌ها

روش حل در تحقیق حاضر دو الگوریتم *NSGAII* و الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه یا *MOGWO* می‌باشد که در ابتدا اعتبار سنجی مدل صورت گرفته و سپس مساله در ابعاد بزرگ حل شده و نتایج حل دو الگوریتم *NSGAII* و *MOGWO* باهم مقایسه شده و با روش دقیق نیز قیاس می‌گردد. سپس تحلیل حساسیت پارامتری صورت گرفته و در انتها تحلیل عدم قطعیت و اثر آن بر اهداف مساله موردبررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های موردنظر در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌گردند.

۸-۱- اعتبار سنجی مدل

در این بخش اعتبار سنجی مدل صورت می‌گیرد. به‌منظور اعتبار سنجی مدل، مدل در ابعاد کوچک حل شده و نتایج حاصل از سه هدف یعنی زمان ساخت، هزینه تعمیر و نگهداری و ساخت و هزینه حمل‌ونقل با افزایش ابعاد در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر تعیین می‌شود که با افزایش ابعاد چه تاثیری بر اهداف حاصل شده و در صورت افزایش مقادیر اهداف می‌توان گفت مدل دارای اعتبار می‌باشد ضمن اینکه جدا از مقادیر توابع هدف، زمان محاسبه نیز در نظر گرفته می‌شود. در **جدول ۱** ابتدا ابعاد کل مساله معرفی می‌شود. همان‌گونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود ۳۰ مثال در نظر گرفته شده که در هر مساله نسبت به مساله قبلی ابعاد افزایش می‌یابد و این افزایش ابعاد می‌تواند سنجه‌ای در خصوص اعتبار مدل باشد اگر

افزایش ابعاد منجر به افزایش مقادیر توابع هدف و زمان محاسبه شود می‌توان گفت مدل از اعتبار لازم برخوردار می‌باشد نتایج این اعتبار سنجی در **جدول ۲** ارایه شده است.

جدول ۱- ابعاد مساله.

Table 1- Dimensions of the problem.

مساله	قطعه	عملیات	ابزار	ماشین	کارخانه
1	5	3	1	2	1
2	5	3	1	3	1
3	6	3	1	3	1
4	6	3	2	3	1
5	7	4	2	3	1
6	7	4	2	4	1
7	8	4	2	4	1
8	8	4	2	4	2
9	9	4	2	4	2
10	9	4	2	5	2
11	10	5	2	5	2
12	10	5	3	5	2
13	11	5	3	5	2
14	11	5	3	6	2
15	12	5	3	6	2
16	12	5	3	6	3
17	13	6	3	6	3
18	14	6	3	6	3
19	14	6	4	6	3
20	14	6	4	7	3
21	15	6	4	7	3
22	15	6	4	7	4
23	16	7	4	7	4
24	16	7	5	7	4
25	17	7	5	8	4
26	18	7	5	8	4
27	18	8	5	8	4
28	19	8	5	8	4
29	19	8	5	9	4
30	20	8	5	10	4

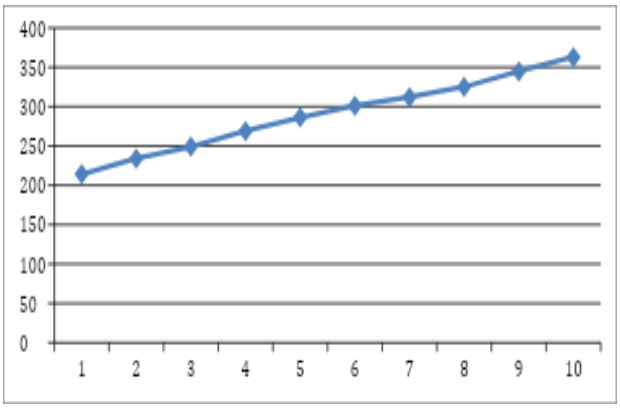
جدول ۲- اعتبار سنجی مدل.

Table 2- Model validation.

مساله	زمان ساخت	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل‌ونقل	زمان حل
1	214	148752	21547	21
2	234	150137	21687	38
3	249	151215	21798	58
4	269	152852	21991	69
5	286	154311	22136	88
6	301	155433	22251	100
7	312	157413	22395	110
8	325	159254	22562	125
9	345	160483	22728	137
10	363	162329	22866	154
11				Low Memory
12				Low Memory
13				Low Memory
14				Low Memory

در جدول فوق مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد مساله مقادیر توابع هدف و همچنین زمان محاسبه افزایش یافته و مساله با استفاده از روش دقیق تا مساله دهم قابل‌حل بوده است؛ اما از مساله یازدهم به بعد ما با خطای *Low Memory* مواجه شده‌ایم که این امر نشان می‌دهد از مثال ۱۱ به بعد

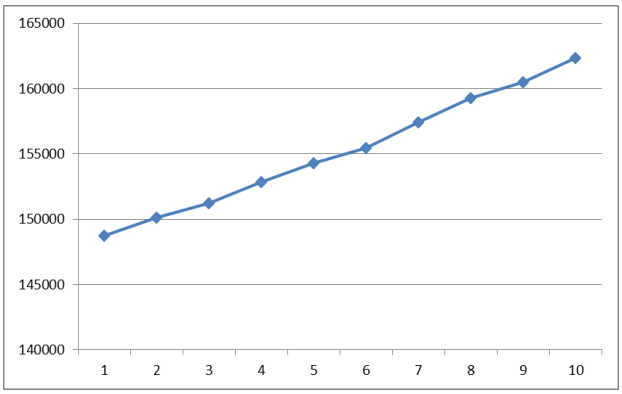
مساله با استفاده از روش‌های دقیق قابل‌حل نبوده و به سبب *NpHard* بودن می‌بایست از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل آن استفاده شود. نتایج افزایش پارامترهای اهداف مساله در شکل‌های ذیل ارایه شده است.



شکل ۲- افزایش مقدار تابع هدف اول با افزایش ابعاد مساله.

Figure 2- Increasing the value of the first objective function with increasing problem dimensions.

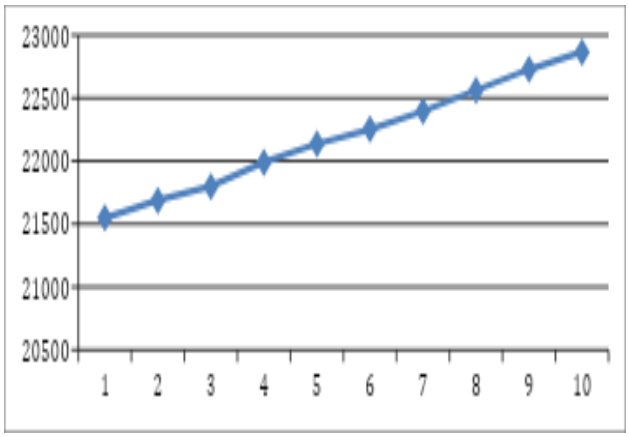
در شکل فوق دیده می‌شود با افزایش ابعاد مقدار تابع هدف اول مساله یعنی زمان ساخت نیز افزایش یافته است.



شکل ۳- افزایش مقدار تابع هدف دوم با افزایش ابعاد مساله.

Figure 3- Increasing the value of the second objective function with increasing problem dimensions.

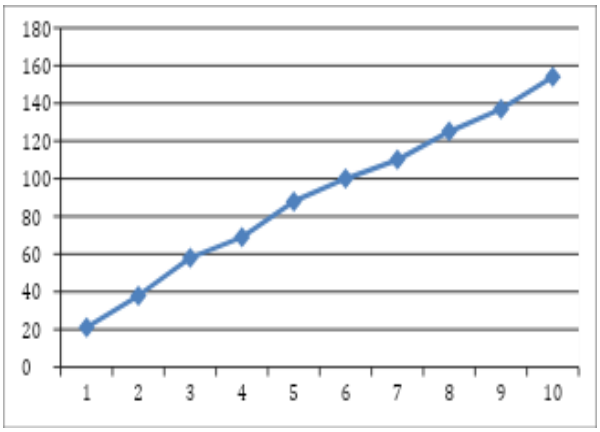
هزینه‌های تعمیر و نگهداری و ساخت نیز با افزایش ابعاد مساله دچار افزایش شده است که این امر مو ید اعتبار مدل می‌باشد.



شکل ۴- افزایش مقدار تابع هدف سوم با افزایش ابعاد مساله.

Figure 4- Increasing the value of the third objective function with increasing problem dimensions.

در شکل فوق دیده می‌شود که با افزایش ابعاد مساله یعنی هزینه حمل‌ونقل نیز افزایش یافته است.



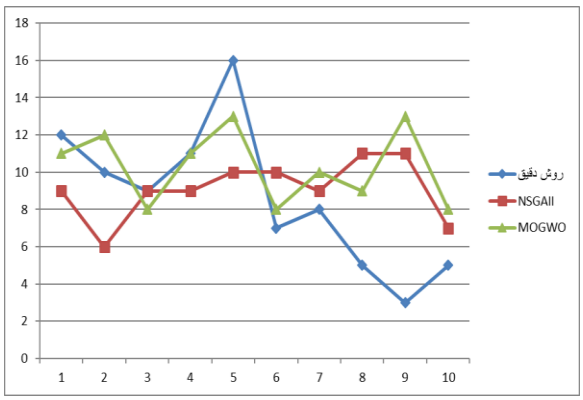
شکل ۵- افزایش زمان محاسبه با افزایش ابعاد مساله.

Figure 5- Increase in computation time with increasing problem dimensions.

زمان محاسبه می‌تواند به‌عنوان چهارمین معیاری باشد که برای اعتبار سنجی مدل استفاده می‌شود با افزایش ابعاد مساله از مساله اول تا دهم شاهد افزایش زمان محاسبه می‌باشیم که این امر نشانگر اثبات اعتبار مدل می‌باشد.

تا این جای کار مساله در ابعاد کوچک حل شد و نتایج آن منجر به اعتبار سنجی گردید؛ اما همان‌گونه که مشاهده شد روش دقیق تا مثال‌های مشخصی قادر به حل مسایل می‌باشد و با افزایش ابعاد نمی‌توان انتظار داشت که روش دقیق همچنان جوابگو باشد. از سوی دیگر در دنیای واقعی مسایل زمان‌بندی محدود به تعداد کمی قطعه یا ماشین‌آلات نیست و ممکن است حجم ماشین‌آلات بیش از آن چیزی باشد که در روش دقیق اعمال گردید لذا در اینجا از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای جبران نقص روش‌های دقیق در حل مسایل بزرگ استفاده می‌شود. در جدول ذیل نتایج حاصل از حل مدل در ابعاد کوچک بزرگ و متوسط با استفاده از روش‌های دقیق، الگوریتم *NSGAII* و *MOGWO* ارایه گردیده است و ۴ معیار تعداد نقاط پارتو، معیار پراکندگی، شاخص فاصله تا نقطه ایده آل و زمان حل به ثانیه ارایه گردیده است. نتایج در **جدول ۳** ارایه شده است.

برای روشن شدن مقایسه از شکل برای مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود.



شکل ۶- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید نقاط پارتو.

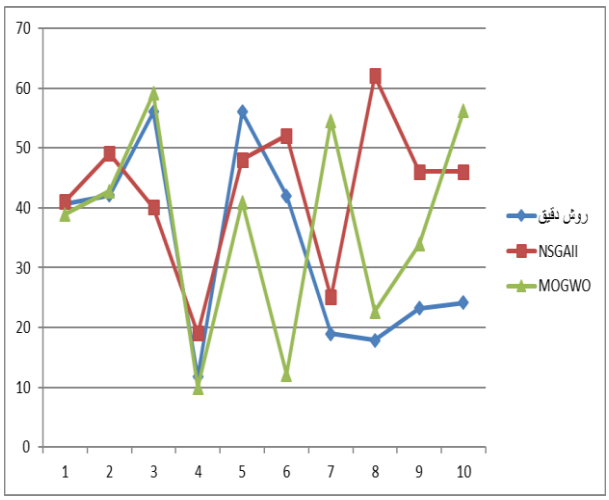
Figure 6- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of generating Pareto points.

در شکل فوق مقایسه روش‌های مورد استفاده بر اساس مسایل ۱ تا ۱۰ ارایه گردیده و نتایج به‌صورت شکل پارتو ارایه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش دقیق در مساله پنجم موفق به تولید بیشترین نقاط پارتو شده و ازآنجایی‌که معیار نقاط پارتو بر اساس بیشینه‌ترین می‌باشد یعنی هر روشی که بیشترین نقاط را تولید کرده باشد دارای عملکرد بهتری است لذا می‌توان گفت در خصوص این مساله روش دقیق عملکرد بهتری داشته است اما به دلیل نوسانات بالا در تولید نقاط پارتو چندان نمی‌توان روش دقیق را معیار دانست و می‌توان گفت الگوریتم *MOGWO* از دو روش دیگر در تولید نقاط پارتو موفق‌تر بوده است.

جدول ۳- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر معیارهای چهارگانه.

Table 3- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of four criteria.

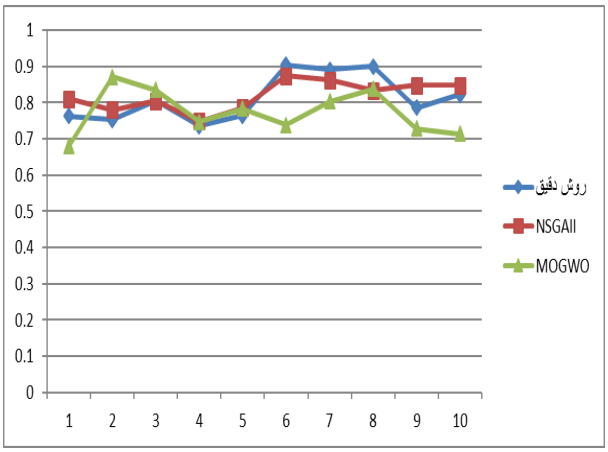
	روش دقیق			NSGAII				MOGWO			
مساله	تعداد نقاط پاره تو	معیار پراکندگی	شاخص MID	زمان حل به ثانیه	تعداد نقاط پاره تو	معیار پراکندگی	شاخص MID	زمان حل به ثانیه	تعداد نقاط پارتو	معیار پراکندگی	شاخص MID	زمان حل به ثانیه
1	12	40.67675	0.762732	21	9	41.09543	0.811267	32	11	38.92406	0.68	42
2	10	42.07769	0.753148	38	6	49.0596	0.781056	47	12	42.7857	0.87	49
3	9	56.07379	0.8062	58	9	40.07317	0.80517	58	8	59.12778	0.83	68
4	11	11.72262	0.735135	69	9	19.06003	0.748386	70	11	9.973629	0.75	76
5	16	56.07423	0.76437	88	10	48.05177	0.786143	81	13	40.95506	0.78	92
6	7	42.05845	0.904561	100	10	52.09897	0.874783	102	8	12.14174	0.74	103
7	8	18.98152	0.891556	110	9	25.08553	0.862393	112	10	54.58385	0.80	116
8	5	17.854	89.985	125	11	62.05682	0.834281	135	9	22.65526	0.84	133
9	3	23.245	78.554	137	11	46.09091	0.848825	150	13	33.90457	0.73	149
10	5	24.14825	82.254	154	7	46.05904	0.847949	175	8	56.17748	0.71	161
11					7	38.58047	0.881353	179	11	33.65536	0.73	172
12					12	48.06004	0.9042	190	10	46.0075	0.82	178
13					7	41.0665	0.898588	211	13	29.60076	0.76	186
14					10	48.59033	0.853414	227	14	51.49927	0.67	203
15					9	56.71907	0.875969	252	15	57.69063	0.77	221
16					12	49.9478	0.779495	262	15	39.70712	0.71	243
17					12	51.74392	0.671017	285	10	57.17827	0.76	267
18					11	42.18944	0.819318	300	16	45.51992	0.82	284
19					16	41.19319	0.88473	324	6	43.23898	0.83	311
20					11	54.07759	0.819344	344	11	40.27758	0.81	333
21					6	36.00683	0.846073	355	9	47.35149	0.67	359
22					12	56.7108	0.810771	378	8	43.16729	0.80	372
23					11	48.21727	0.774527	407	8	46.33943	0.73	396
24					12	45.29695	0.87506	429	12	40.19785	0.88	422
25					8	49.13354	0.851545	446	10	60.67836	0.82	440
26					16	46.60002	0.801163	459	11	41.22107	0.72	463
27					10	37.71592	0.713219	478	12	50.72197	0.76	487
28					11	53.18086	0.677046	493	10	45.68458	0.69	510
29					13	36.622	0.749076	514	11	58.42622	0.82	531
30					13	58.96158	0.835031	537	7	37.7584	0.76	546



شکل ۷- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید معیار پراکندگی.

Figure 7- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of generating the dispersion criterion.

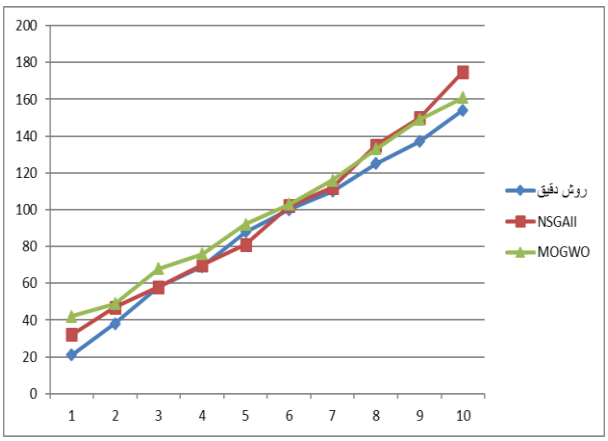
از نظر معیار پراکندگی که روشی مبتنی بر کمینه‌ترین‌ها می‌باشد، می‌توان گفت الگوریتم *MOGWO* پراکندگی کمتری را ایجاد کرده است و الگوریتم *NSGAII* نسبتا میزان زیادی پراکندگی را به وجود آورده است.



شکل ۸- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر فاصله تا نقطه ایده آل.

Figure 8- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of distance to the ideal point.

فاصله تا نقطه ایده آل معیار دیگری است که کمترین‌ها در آن عملکرد بهتری دارند. نتایج شکل فوق نشان می‌دهد که الگوریتم *MOGWO* بیش از سایر روش‌ها کمترین فاصله تا نقطه ایده آل را به وجود آورده و بنابراین این الگوریتم دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده می‌باشد.

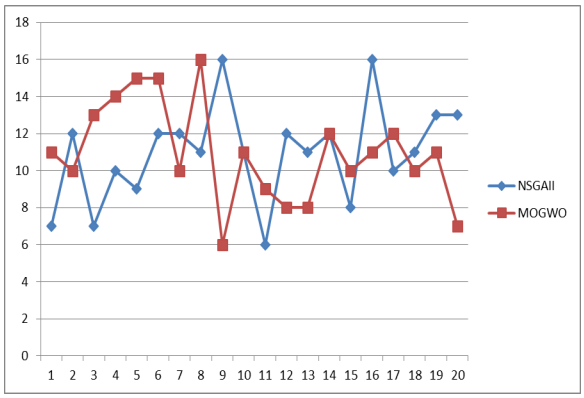


شکل ۹- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر زمان محاسبه.

Figure 9- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of computation time.

شکل فوق نشان می‌دهد که در زمان محاسبه به‌عنوان چهارمین معیار روش دقیق دارای کمترین زمان می‌باشد البته نمی‌توان تفاوت چندانی بین سه روش مشاهده کرد اما روش دقیق با فاصله‌ای اندک از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

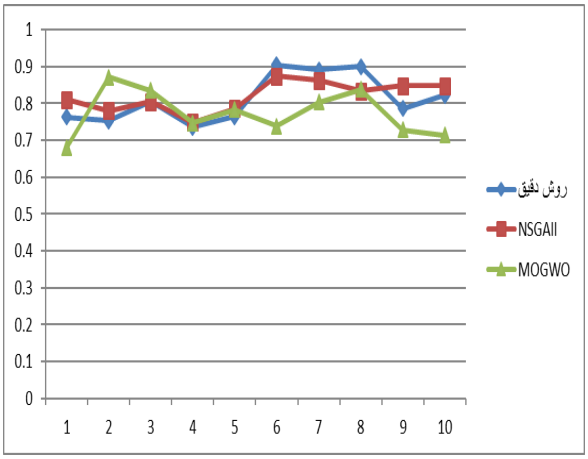
تا اینجا مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مثال‌های با ابعاد کوچک صورت گرفت که به دلیل آنکه روش دقیق قادر به حل صرفا مسایل کوچک می‌باشد در ادامه مثال‌های بزرگ و متوسط با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری *MOGWO* و *NSGAII* صورت می‌گیرد. لذا از مثال یازدهم تا سی‌ام مقایسه این الگوریتم‌ها از نظر کارایی صورت می‌گیرد و نتایج در قالب شکل‌های بعدی ارایه می‌گردد.



شکل ۱۰- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید معیار پراکندگی.

Figure 10- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of generating the dispersion criterion.

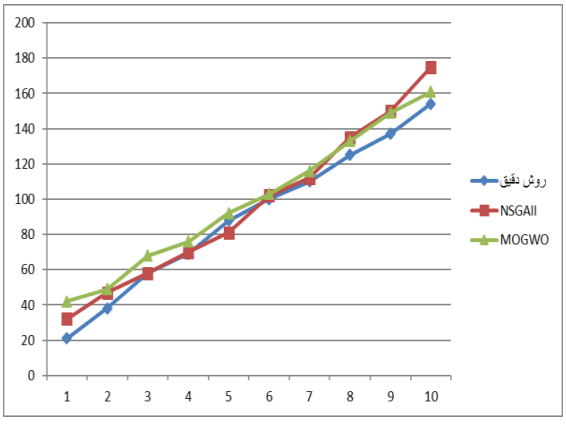
از نظر معیار پراکندگی که روشی مبتنی بر کمینه‌ترین‌ها می‌باشد، می‌توان گفت الگوریتم *MOGWO* پراکندگی کمتری را ایجاد کرده است و الگوریتم *NSGAII* نسبتا میزان زیادی پراکندگی را به وجود آورده است.



شکل ۱۱- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر فاصله تا نقطه ایده آل.

Figure 11- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of distance to the ideal point.

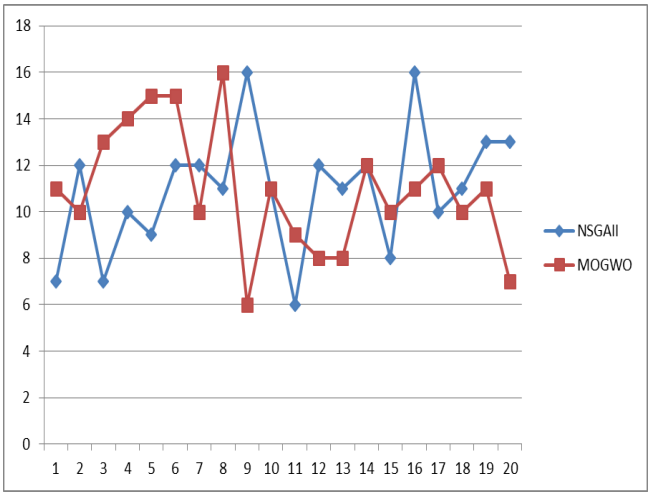
فاصله تا نقطه ایده آل معیار دیگری است که کمترین‌ها در آن عملکرد بهتری دارند. نتایج شکل فوق نشان می‌دهد که الگوریتم *MOGWO* بیش از سایر روش‌ها کمترین فاصله تا نقطه ایده آل را به وجود آورده و بنابراین این الگوریتم دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده می‌باشد.



شکل ۱۲- مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر زمان محاسبه.

Figure 12- Comparison of the exact method and meta-heuristic algorithms in terms of computation time.

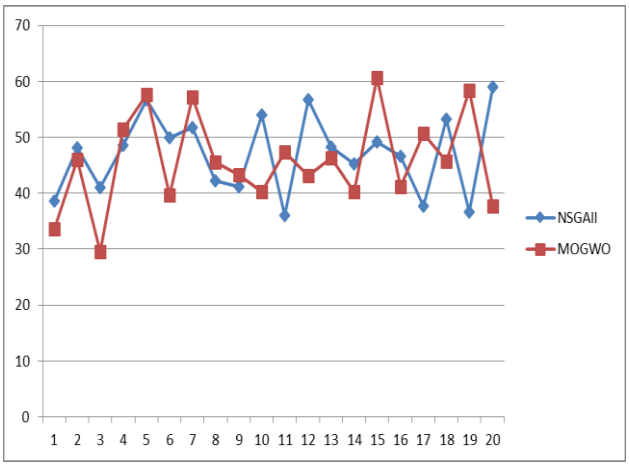
شکل فوق نشان می‌دهد که در زمان محاسبه به‌عنوان چهارمین معیار روش دقیق دارای کمترین زمان می‌باشد البته نمی‌توان تفاوت چندانی بین سه روش مشاهده کرد اما روش دقیق با فاصله‌ای اندک از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. تا اینجا مقایسه روش دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مثال‌های با ابعاد کوچک صورت گرفت که به دلیل آنکه روش دقیق قادر به حل صرفا مسایل کوچک می‌باشد در ادامه مثال‌های بزرگ و متوسط با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری *MOGWO* و *NSGAII* صورت می‌گیرد. لذا از مثال یازدهم تا سی‌ام مقایسه این الگوریتم‌ها از نظر کارایی صورت می‌گیرد و نتایج در قالب شکل‌های بعدی ارایه می‌گردد.



شکل ۱۳- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر تولید نقاط پارتو در مسایل بزرگ و متوسط.

Figure 13- Comparison of meta-heuristic algorithms in terms of generating Pareto points in large and medium-sized problems.

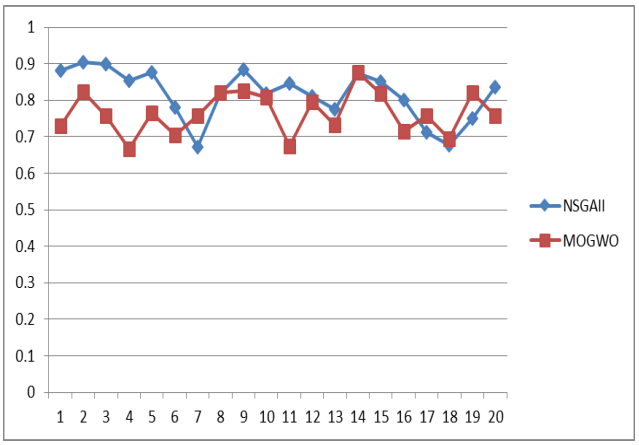
همان‌گونه که دیده می‌شود از نظر تولید نقاط پارتو الگوریتم *NSGAII* در مجموع در مثال‌های بزرگ توانسته است نقاط پارتوی بیشتری را تولید کند البته در مثال‌های متوسط شاهد چیرگی الگوریتم *MOGWO* می‌باشد اما در مثال‌های بزرگ کاملا شرایط تغییر کرده و الگوریتم *NSGAII* به نسبت تولیدات بیشتری از منظر نقاط بهینه پارتو دارا می‌باشد.



شکل ۱۴- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر معیار پراکندگی در مسایل بزرگ و متوسط.

Figure 14- Comparison of metaheuristic algorithms in terms of dispersion criterion in large and medium problems.

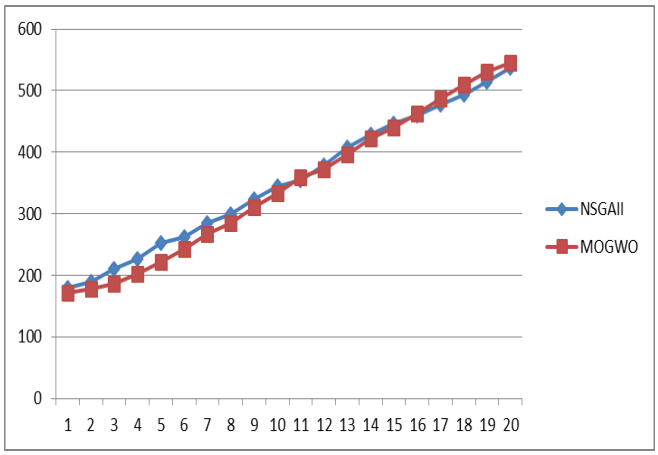
در شکل فوق دیده می‌شود که الگوریتم *MOGWO* از نظر معیار پراکندگی در مسایل متوسط وضعیت بهتری را دارد اما هر چه مسایل بزرگتر می‌شود به نظر می‌رسد کارایی الگوریتم *NSGAII* بهتر می‌شود بنابراین می‌توان در مجموع گفت که در خصوص معیار پراکندگی تفاوت چندانی بین دو الگوریتم وجود ندارد.



شکل ۱۵- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر فاصله تا نقطه ایده آل در مسایل بزرگ و متوسط.

Figure 15- Comparison of metaheuristic algorithms in terms of distance to the ideal point in large and medium problems.

در خصوص فاصله تا نقطه ایده آل الگوریتم *MOGWO* هم در مسایل متوسط و هم در مسایل بزرگ عملکرد بهتری را نشان می‌دهد چراکه فاصله کمتری تا نقطه ایده آل به وجود آورد است. این عملکرد در شکل فوق کاملا محسوس است.



شکل ۱۶- مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری از نظر زمان محاسبه در مسایل بزرگ و متوسط.

Figure 16- Comparison of metaheuristic algorithms in terms of computation time for large and medium problems.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مسایل متوسط عملکرد *MOGWO* بهتر از *NSGAII* می‌باشد اما در مسایل بزرگ تفاوت چندانی بین دو الگوریتم دیده نمی‌شود.

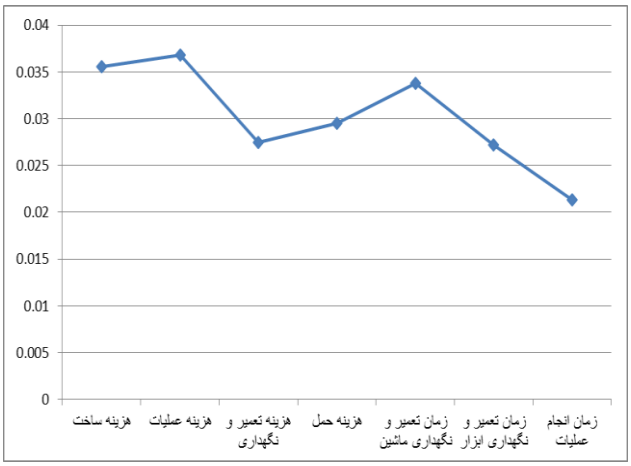
۲-۸- مقایسه تحلیل‌ها

در این بخش به مقایسه تحلیل‌ها پرداخته شده و مشخص می‌شود که بیشترین اثرگذاری به تفکیک هر پارامتر بر هر هدف کدام است.

جدول ۴- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر زمان ساخت.

Table 4- Comparison of the effect of different parameters on construction time.

زمان ساخت	هزینه ساخت	هزینه عملیات	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل	زمان تعمیر و نگهداری ماشین	زمان تعمیر و نگهداری ابزار	زمان انجام عملیات
10%	0.011161	0.006696	0.002232	0.004464	0.006696	0.006696	0.004464
20%	0.013245	0.017738	0.011136	0.011111	0.008869	0.015521	0.008889
30%	0.015251	0.028322	0.017621	0.017582	0.015385	0.017467	0.013216
40%	0.025751	0.036017	0.025974	0.023758	0.025974	0.025751	0.017391
50%	0.035565	0.03681	0.027426	0.029536	0.033755	0.027197	0.021368



شکل ۱۷- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر زمان ساخت.

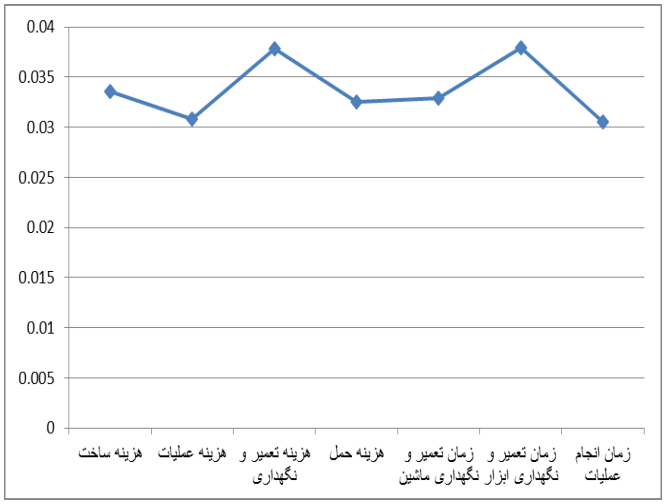
Figure 17- Comparison of different effects on construction time.

همان‌گونه که دیده می‌شود اثرگذارترین پارامتر بر زمان ساخت هزینه عملیات می‌باشد که بیش از ۳٫۵% منجر به افزایش زمان ساخت می‌شود کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات است که اندکی بیش از ۲% اثرگذار است.

جدول ۵- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه تعمیر و نگهداری.

Table 5- Comparison of the effect of different parameters on maintenance costs.

هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه ساخت	هزینه عملیات	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل	زمان تعمیر و نگهداری ماشین	زمان تعمیر و نگهداری ابزار	زمان انجام عملیات
10%	0.005601	0.008569	0.009389	0.005289	0.006766	0.007673	0.004843
20%	0.011803	0.015358	0.017212	0.011835	0.011684	0.015828	0.010805
30%	0.020469	0.020253	0.024557	0.018579	0.019934	0.0237	0.016492
40%	0.028021	0.025928	0.030615	0.026363	0.02472	0.030689	0.024408
50%	0.033596	0.030847	0.037826	0.032509	0.032908	0.037931	0.030491



شکل ۱۸- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه تعمیر و نگهداری.

Figure 18- Comparison of the effect of different parameters on maintenance costs.

بر اساس شکل فوق دیده می‌شود که زمان تعمیر نگهداری ابزار و هزینه تعمیر و نگهداری دارای بیشترین اثر بر هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشند و نکته جالب‌توجه این است که اثر زمان تعمیر و نگهداری ابزار بیش از زمان تعمیر و نگهداری ماشین می‌باشد. اثرگذاری این دو پارامتر به میزان ۳٫۷% می‌باشد. کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات و هزینه عملیات به میزان ۳% می‌باشد.

جدول ۶- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه حمل‌ونقل.

Table 6- Comparison of the effect of different parameters on transportation costs.

هزینه حمل‌ونقل	هزینه ساخت	هزینه عملیات	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل	زمان تعمیر و نگهداری ماشین	زمان تعمیر و نگهداری ابزار	زمان انجام عملیات
10%	0.004055	0.004568	0.004446	0.003982	0.004788	0.004422	0.003444
20%	0.008491	0.007927	0.006956	0.008735	0.008825	0.00822	0.007498
30%	0.012304	0.010833	0.009564	0.01112	0.012508	0.012254	0.011647
40%	0.016372	0.01518	0.013086	0.014242	0.016661	0.01487	0.015334
50%	0.019837	0.019608	0.017593	0.017593	0.019713	0.017165	0.018678

شکل ۱۹- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر هزینه حمل‌ونقل.

Figure 19- Comparison of the effect of different parameters on transportation costs.

همان‌گونه که دیده می‌شود بیشترین اثرگذاری بر هزینه حمل‌ونقل از سوی پارامتر هزینه ساخت به میزان تقریبا ۲% می‌باشد در حالی‌که دو پارامتر بعدی اثرگذار هزینه عملیات و زمان تعمیر و نگهداری ماشین به میزان ۱٫۹۵% می‌باشد که فاصله چندانی با پارامتر اولیه نشان نمی‌دهد. کم اثرگذاری‌ترین پارامتر زمان تعمیر و نگهداری ابزار می‌باشد که اثر ۱٫۷ درصدی را نشان می‌دهد.

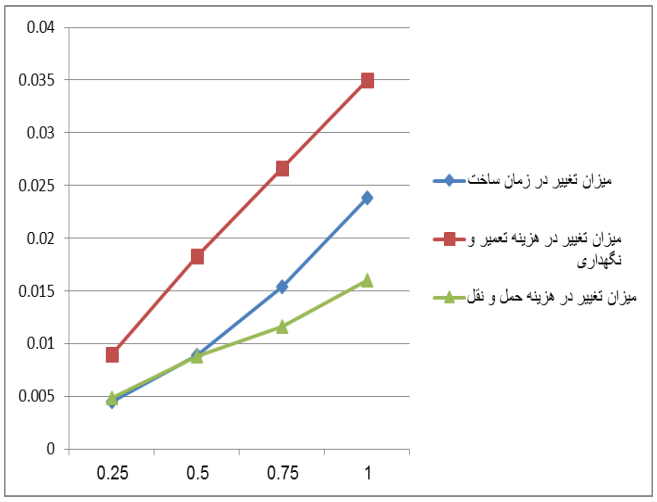
۳-۸ - تحلیل عدم قطعیت

با توجه به عدم قطعیت مورد نظر در مدل تحقیق حاضر تحلیل عدم قطعیت با توجه به مقدار آلفا انجام شده و نشان داده می‌شود که با افزایش عدم قطعیت کدام هدف بیش از همه متاثر می‌شود. نتایج در جدول ذیل نشان داده شده است.

جدول ۷- بررسی اثر عدم قطعیت بر اهداف تحقیق.

Table 7 - Examining the effect of uncertainty on research objectives.

آلفا	زمان ساخت	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه حمل‌ونقل	میزان تغییر در زمان ساخت	میزان تغییر در هزینه تعمیر و نگهداری	میزان تغییر در هزینه حمل‌ونقل
0	448	208532	40936			
0.25	450	210404	41135	0.004464	0.008977	0.004861
0.5	454	214258	41498	0.008889	0.018317	0.008825
0.75	461	219966	41981	0.015419	0.026641	0.011639
1	472	227666	42652	0.023861	0.035005	0.015983



شکل ۲۰- بررسی اثر عدم قطعیت بر اهداف تحقیق.

Figure 20- Examining the effect of uncertainty on research objectives.

همان‌گونه که دیده می‌شود عدم قطعیت منجر به بدتر شدن جواب در خصوص هدف دوم یعنی تغییر در هزینه تعمیر و نگهداری می‌شود پس از آن بیشترین اثر بر پارامتر زمان ساخت و پس از آن بر هزینه حمل‌ونقل مشاهده می‌شود. در واقع با آلفای ۱ ما شاهد هستیم که ۳٫۵% بر هزینه تعمیر و نگهداری اضافه می‌شود که این نشانگر بدتر شدن جواب می‌شود اما در خصوص زمان ساخت این مقدار نزدیک به ۲٫۵% و در خصوص هزینه حمل‌ونقل ۱٫۵% می‌باشد بنابراین بیشترین اثرگذاری عدم قطعیت بر هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد.

۹- پاسخ به سوالات تحقیق

چگونه می‌توان عملیات از یک قطعه در هر کارخانه را با فرض اینکه برخی پارامترها به‌صورت فازی است تخصیص داد به‌طوری‌که حداقل زمان تکمیل به دست آید؟

اثرگذارترین پارامتر بر زمان تکمیل، هزینه عملیات می‌باشد که بیش از ۳٫۵% منجر به افزایش زمان ساخت می‌شود کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات است که اندکی بیش از ۲% اثرگذار است.

زمان‌بندی تخصیص این قطعات وقتی برخی پارامترها فازی می‌باشد و نگهداری تعمیرات در نظر گرفته شده است چگونه می‌باشد؟

بر اساس نتایج زمان تعمیر و نگهداری ابزار دارای بیشترین اثر بر هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشند و همچنین اثر زمان تعمیر و نگهداری ابزار بیش از زمان تعمیر و نگهداری ماشین می‌باشد. اثرگذاری این دو پارامتر به میزان ۳٫۷% می‌باشد. کم اثرترین پارامتر زمان انجام عملیات و هزینه عملیات به میزان ۲% می باشد. در صورت *NP-hard* بودن مدل، کدینگ آن به‌صورت یک روش فرا ابتکاری چگونه است؟

در این حالت برای حل مساله از یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم‌های جانسون استفاده خواهد شد. در این روش سیستم تولید به دو مرحله کلی پردازش و تکمیل تفکیک خواهد شد و با در نظر گرفتن زمان پردازش مجموعه قطعات هر محصول و زمان تکمیل آن قاعده جانسون برای تعیین توالی محصولات توسعه داده می‌شود سپس روش‌های ابتکاری برای زمان‌بندی پردازش قطعات در جریان تولید انبوه بررسی می‌شود. ازآنجاکه در این پژوهش زمان‌های آماده‌سازی و انتقال قطعه اهمیت بالایی دارد برای این شرایط نیز روشی مبتنی بر الگوریتم‌های فرا ابتکاری و الگوریتم‌های شاخه و کران برای مسایل توسعه داده می‌شود.

۱۰- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق توسعه مدل ریاضی برای مساله سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر بود. با توجه به افزایش فشارهای رقابتی موجود در صنایع مختلف تولیدکنندگان انعطاف‌پذیر ضمن جلب رضایت مشتریان سعی می‌کنند که محصولات را طبق خواست مشتری و مناسب با بازار تولید کنند. براین

اساس آن‌ها می‌توانند محصولات خود را با قیمت بهتر و بالاتر بفروشند تا بدین ترتیب مرزهای سود بالاتر را حفظ کنند؛ اما رقبایی که به شیوه انبوه تولید می‌کنند بیشتر تحت تاثیر بازار هستند و این بازار و مشتری است که قیمت را بر آن‌ها تحمیل می‌کند. اغلب دیده شده است که تولید کالاهای مشتری‌پسند در محیطی که از تکنولوژی بالایی برخوردار است مشکل و حتی ممکن است فروش نرود. در این شرایط تولیدکنندگانی که استراتژی انعطاف‌پذیر را اتخاذ کرده‌اند، می‌توانند با اتخاذ استراتژی‌های منعطف و به‌موقع از این شرایط جان سالم بدر ببرند.

مساله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر یکی از موضوعات بارز در برنامه‌ریزی تولید می‌باشد. اهداف مساله کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل آخرین سفارش (*max*) حداکثر بار کاری ماشین‌ها (*Wmax*) و بارکاری کل (*W*) یعنی مجموع بار کاری تمام ماشین‌ها است. مساله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر جز مسایل *NP-hard* محسوب می‌شود؛ بنابراین به دست آوردن جواب بهینه برای مسایل با سایز متوسط و بزرگ در زمان معقول امکان‌پذیر نیست و باید از روش‌های ابتکاری یا فرا ابتکاری برای حل مساله استفاده نمود. به همین منظور دو الگوریتم *NSGAII* و *MOGWO* برای حل این مساله استفاده شده به‌طوری‌که در ابتدا اعتبار سنجی مدل صورت گرفته و برای این منظور مدل در ابعاد کوچک حل شده و نتایج حاصل از سه هدف یعنی زمان ساخت، هزینه تعمیر و نگهداری و ساخت و هزینه حمل‌ونقل با افزایش ابعاد در نظر گرفته شد. پس از حل مدل در ابعاد کوچک نتایج حاصل از متغیرهای تصمیم برای مشخص شدن این‌که جایگشت‌های مساله زمان‌بندی به تفکیک قطعه، ماشین، کارخانه و ابزار به چه صورت است و نتایج در قالب یک الگو ارایه گردید. در الگوی ساخته‌شده ترتیب و توالی جایگشت‌های مساله تعیین‌شده و مشخص شد که کدام ماشین به کدام قطعه در کدام کارخانه و کدام ابزار تخصیص یافته است و بهترین توالی فعالیت‌ها ایجاد شد. از معیارهایی که بر دقت عملکرد تاثیر دارد شال، تولید بیشترین نقاط پارتو، کمترین فاصله تا نقطه ایده آل، کمترین زمان است. نتایج نشان می‌دهد در مسایل متوسط عملکرد *MOGWO* بهتر از *NSGAII* می‌باشد؛ اما در مسایل بزرگ تفاوت چندانی بین دو الگوریتم دیده نشده است.

منابع

[1] Abou Gamila, M., & Motavalli, S. (2003). A modeling technique for loading and scheduling problems in FMS. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *19*(1–2), 45–54. https://doi.org/10.1016/S0736-5845(02)00061-3

[2] Jahromi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A., & Saghaei, A. (2017). A new mathematical model for a scheduling problem of dynamic machine-tool selection and operation allocation in a flexible manufacturing system: A modified evolutionary algorithm. *Scientia iranica*, *24*(2), 765–777. https://doi.org/10.24200/sci.2017.4060

[3] Low, C., Yip, Y., & Wu, T. H. (2006). Modelling and heuristics of FMS scheduling with multiple objectives. *Computers & operations research*, *33*(3), 674–694. https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.013

[4] Celen, M., & Djurdjanovic, D. (2012). Operation-dependent maintenance scheduling in flexible manufacturing systems. *CIRP journal of manufacturing science and technology*, *5*(4), 296–308. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.09.005

[5] Jahromi, M. H. M. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). A novel 0-1 linear integer programming model for dynamic machine-tool selection and operation allocation in a flexible manufacturing system. *Journal of manufacturing systems*, *31*(2), 224–231. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.07.008

[6] Chan, F. T. S., & Swarnkar, R. (2006). Ant colony optimization approach to a fuzzy goal programming model for a machine tool selection and operation allocation problem in an FMS. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *22*(4), 353–362. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.08.001

[7] Buyurgan, N., Saygin, C., & Kilic, S. E. (2004). Tool allocation in flexible manufacturing systems with tool alternatives. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *20*(4), 341–349. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.01.001

[8] Chen, J. H., & Ho, S.Y. (2005). A novel approach to production planning of flexible manufacturing systems using an efficient multi-objective genetic algorithm. *International journal of machine tools and manufacture*, *45*(7–8), 949–957. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.10.010

[9] Nagarjuna, N., Mahesh, O., & Rajagopal, K. (2006). A heuristic based on multi-stage programming approach for machine-loading problem in a flexible manufacturing system. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *22*(4), 342–352. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.07.006

[10] Mahdavi, I., Jazayeri, A., Jahromi, M., Jafari, R., & Iranmanesh, H. (2008). P-ACO approach to assignment problem in FMSs. *Proceedings of word academy of science, engineering and technology*, *42*(5), 196–203. https://www.academia.edu/download/103090636/14341.pdf

[11] Persi, P., Ukovich, W., Pesenti, R., & Nicolich, M. (1999). A hierarchic approach to production planning and scheduling of a flexible manufacturing system. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *15*(5), 373–385. https://doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00034-4

[12] Bouazza, W., Hamdadou, D., Sallez, Y., & Trentesaux, D. (2019). *Manufacturing letters*. https://B2n.ir/tj8213

[13] Lee, C. S., Kim, S. S., & Choi, J. S. (2003). Operation sequence and tool selection in flexible manufacturing systems under dynamic tool allocation. *Computers & industrial engineering*, *45*(1), 61–73. https://doi.org/10.1016/S0360-8352(03)00019-6

[14] Yang, Y., Huang, M., Wang, Z. Y., & Zhu, Q. B. (2020). Robust scheduling based on extreme learning machine for bi-objective flexible job-shop problems with machine breakdowns. *Expert systems with applications*, *158*, 113545. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113545